

## SPIEKBRIEF

Geologie is de studie van de aarde en die begint met het bestuderen van de drie soorten gesteenten die letterlijk de bouwstenen van de aarde zijn. De theorie die alle geologische onderwerpen met elkaar verbindt, *platentektoniek*, stelt dat het aardoppervlak is opgedeeld in een soort puzzelstukjes die rondbewegen. Natuurlijk heeft de aarde er niet altijd zo uitgezien als tegenwoordig, dus proberen geologen het verhaal van de evolutie van de aarde af te lezen aan de gesteentelagen. Hierbij hebben ze de *geologische tijdschaal* in kaart gebracht, die de geschiedenis van de aarde in tijdsegmenten verdeelt aan de hand van grote biologische veranderingen die zich de afgelopen 4,5 miljard jaar hebben voorgedaan.

## De drie soorten gesteenten en de gesteentecyclus

Geologen delen het gesteente van de aardkorst aan de hand van hun ontstaansproces in drie categorieën in: stollingsgesteenten, sedimentaire en metamorfe gesteenten. Elk type gesteente heeft zijn eigen unieke kenmerken:

- » **Stollingsgesteente.** Stollingsgesteenten ontstaan als gesmolten gesteente (lava of magma) tot een vaste vorm afkoelt. Als de afkoeling ondergronds plaatsvindt, is er sprake van een intrusief of plutonisch stollingsgesteente. Heeft de afkoeling op het aardoppervlak plaatsgevonden, dan is het gesteente een extrusief of vulkanisch gesteente.

De verschillende soorten stollingsgesteenten worden op basis van hun textuur en samenstelling ingedeeld.

- » **Metamorf gesteente.** Metamorfe gesteenten ontstaan als bestaande gesteenten worden blootgesteld aan intense hitte en druk, meestal diep onder het aardoppervlak. Onder zulke omstandigheden veranderen de oorspronkelijke mineralen van het gesteente in nieuwe mineralen.

Metamorfe gesteenten worden ingedeeld op basis van de mate van verandering ten opzichte van het oorspronkelijke of moedergesteente. Bij een lage graad van verandering lijkt het metamorfe gesteente nog veel op het moedergesteente, terwijl het bij een hoge graad van metamorfisme zo sterk verandert dat het er heel anders dan het moedergesteente uitziet.

- » **Sedimentair gesteente.** Sedimentaire of afzettingsgesteenten zijn detritisch of chemisch. *Detritisch* gesteente ontstaat door de verdichting van afzonderlijke sedimentdeeltjes tot steen. Die deeltjes zijn stukjes van een ander, reeds bestaand gesteente dat is verweerd en door wind, water, ijs of zwaartekracht is getransporteerd. *Chemische* sedimentaire gesteenten worden gevormd uit mineralen die in water zijn opgelost en neerslaan, waarna ze een vast gesteente vormen.

Geologen beschrijven sedimentgesteenten aan de hand van de grootte en vorm van de aanwezige korrels of hun minerale samenstelling (bij chemische sedimentgesteenten).

Het gesteente in de aardkorst wordt voortdurend gerecycled en door geologische processen in nieuwe vormen veranderd. Deze doorlopende transformatie van gesteenten van het ene naar het andere type wordt de *gesteentecyclus* genoemd. Door processen zoals verwerking, verwarming, smelten, koeling en verdichting kan elk gesteentetype in een ander gesteentetype veranderen, want de chemische samenstelling en fysieke kenmerken ervan worden dan getransformeerd.

SPIEKBRIEF

De geologische tijdschaal

De 4,6 miljard jaar dat de aarde bestaat is door geologen opgesplitst in tijdvakken die de belangrijkste veranderingen in het geologische archief markeren. De grootste intervallen zijn *eonen*, waarbij elke eon uit vele miljoenen jaren bestaat. Binnen de eonen bevinden zich *era's*, die beginnen en eindigen met ingrijpende veranderingen in de soorten planten en dieren die op aarde leven. Elke era is opgedeeld in meerdere *perioden*, die op hun beurt zijn opgesplitst in kortere *tijdvakken*.

De tijdsduur van deze verschillende indelingen is variabel, want de verschillende vakken van de geologische tijdschaal zijn gebaseerd op de veranderingen in gefossiliseerde overblijfselen van het leven op aarde. Al deze tijdvakken lijken in het begin misschien verwarrend maar als je eenmaal meer over de belangrijkste gebeurtenissen tijdens de geschiedenis van de aarde te weten komt, leer je de geologische tijdschaal die je hier ziet vanzelf beter kennen. (De getallen aan de rechterkant weerspiegelen de absolute leeftijd, uitgedrukt in miljoenen jaren geleden, van de aarde bij elk interval.)

De geologische tijdschaal wordt voortdurend herzien door nieuw onderzoek en nauwkeurigere dateringsmethoden. Als er nieuwe informatie wordt voorgesteld, bepaalt de International Commission on Stratigraphy of er een officiële wijziging in het tijdschema moet worden doorgevoerd. De recentste versie vind je op de website van deze stratigrafische commissie (<https://stratigraphy.org/>).

| Geologische tijdschaal |               |            |               |             |       |       |
|------------------------|---------------|------------|---------------|-------------|-------|-------|
| EON ERA                |               | PERIODE    |               | TIJDVAK     |       |       |
| Fanerozoïcum           | Cenozoïcum    | Kwartair   |               | Holoceen    | Heden |       |
|                        |               |            |               | Pleistoceen | 0.01  |       |
|                        |               | Tertiair   | Neogeen       | Pliocene    | 2.6   |       |
|                        |               |            |               | Mioceen     | 5.3   |       |
|                        |               |            | Paleogeen     | Oligoceen   | 23.0  |       |
|                        |               |            |               | Eoceen      | 33.9  |       |
|                        |               |            |               | Paleoceen   | 55.8  |       |
|                        | Mesozoïcum    | Krijt      |               |             | 66.1  |       |
|                        |               | Jura       |               |             | 145.5 |       |
|                        |               | Trias      |               |             | 199.6 |       |
|                        | Paleozoïcum   | Perm       |               |             | 251   |       |
|                        |               | Carboon    | Pensylvanien  |             |       | 299   |
|                        |               |            | Mississippien |             |       | 318   |
|                        |               |            |               |             |       | 359.2 |
|                        |               | Devoon     |               |             | 416   |       |
|                        |               | Siluur     |               |             | 443.7 |       |
|                        |               | Ordovicium |               |             | 488.3 |       |
| Cambrium               |               |            | 542           |             |       |       |
| Precambrium            | Proterozoïcum |            |               |             | 2500  |       |
|                        | Archeïcum     |            |               |             | 4000  |       |
|                        | Hadeïcum      |            |               |             |       |       |

# Inhoud in vogelvlucht

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Inleiding</b>                                                             | 1   |
| <b>Deel 1: De aarde bestuderen</b>                                           | 5   |
| HOOFDSTUK 1: Steengoed                                                       | 7   |
| HOOFDSTUK 2: De aarde door een wetenschappelijke bril bekijken               | 17  |
| HOOFDSTUK 3: Verleden, heden en toekomst van geologische inzichten           | 29  |
| HOOFDSTUK 4: Een plek onder de zon: planeet aarde                            | 41  |
| <b>Deel 2: Elementen, mineralen en gesteenten</b>                            | 51  |
| HOOFDSTUK 5: Inleiding in de scheikunde van elementen en verbindingen        | 53  |
| HOOFDSTUK 6: Mineralen: de bouwstenen van gesteente                          | 63  |
| HOOFDSTUK 7: De verschillende soorten gesteenten herkennen                   | 81  |
| <b>Deel 3: Een allesomvattende theorie: platentektoniek</b>                  | 117 |
| HOOFDSTUK 8: Het bewijs voor platentektoniek doornemen                       | 119 |
| HOOFDSTUK 9: Alles is relatief als tektonische platen elkaar ontmoeten       | 131 |
| HOOFDSTUK 10: Mantelconvectie en plaatbewegingen                             | 151 |
| <b>Deel 4: Laag bij de grond: oppervlakteprocessen</b>                       | 167 |
| HOOFDSTUK 11: De zwaartekracht slaat toe: massabeweging                      | 169 |
| HOOFDSTUK 12: Water boven en onder de grond                                  | 179 |
| HOOFDSTUK 13: Traag naar zee stromend: gletsjers                             | 201 |
| HOOFDSTUK 14: Met alle winden meewaaien: sedimenten zonder water verplaatsen | 219 |
| HOOFDSTUK 15: Een dagje aan het strand: de evolutie van kustlijnen           | 231 |
| <b>Deel 5: Lang, heel lang geleden</b>                                       | 241 |
| HOOFDSTUK 16: Grip krijgen op de geologische tijd                            | 243 |
| HOOFDSTUK 17: Een stenen archief van het leven                               | 261 |
| HOOFDSTUK 18: Voordat de tijd begon: het Precambrium                         | 273 |
| HOOFDSTUK 19: Vol leven: het Paleozoïcum                                     | 289 |
| HOOFDSTUK 20: Het Mesozoïcum: tijdperk van de dinosaurussen                  | 307 |
| HOOFDSTUK 21: Het Cenozoïcum: de zoogdieren nemen het over                   | 325 |
| HOOFDSTUK 22: Ten dode opgeschreven: de belangrijkste massa-extincties       | 345 |

# 1

## **De aarde bestuderen**

### IN DIT DEEL . . .

Ontdekken dat je al een wetenschapper bent als je elke dag vragen stelt en er serieus een antwoord op probeert te krijgen!

---

De geschiedenis en ontwikkeling van de geologie leren kennen.

---

Een rondleiding langs de systemen van de aarde, van de atmosfeer tot de binnenmantel en alles wat ertussen ligt.

## IN DIT HOOFDSTUK

De wetenschappelijke studie van de aarde leren kennen

De gesteentecyclus doorlopen

Met de theorie van de platentektoniek meebewegen

Oppervlakteprocessen herkennen

De geschiedenis van de aarde doornemen

# Hoofdstuk 1

# Steengoed

**G**eologie en andere aardwetenschappen staan bekend als makkelijke onderwerpen, of in ieder geval als de minst moeilijke exacte vakken op de middelbare school en de universiteit. Misschien komt dit omdat je de voorwerpen (stenen) die in de geologie worden bestudeerd in je hand kunt houden, ze zonder microscoop of telescoop te bekijken zijn en je ze overal om je heen aantreft, waar je ook bent.

Toch is geologie niet alleen bedoeld voor mensen die de lastige berekeningen van natuurkunde of het intensieve labwerk bij scheikunde willen vermijden. Dit onderwerp is voor iedereen geschikt. Geologie is de wetenschap van de planeet waarop je woont, en dus de wereld waarin je leeft, reden genoeg om er meer over te willen weten. *Geologie* is de studie van de aarde, zijn onderdelen en de processen die verantwoordelijk zijn voor de uiterlijke kenmerken van onze planeet. Bij het bestuderen van geologie moet je ook kennis opdoen van alle andere wetenschappen, in ieder geval een beetje. Aspecten van scheikunde, natuurkunde en biologie (om er enkele te noemen) vormen de basis voor het begrijpen van het geologische systeem van de aarde, zowel van de processen als de resultaten.

# De wetenschapper in jezelf zoeken

Je bent al een wetenschapper. Misschien beseft je het nog niet, maar door gewoon om je heen te kijken en vragen te stellen, gedraag je je op dezelfde manier als een wetenschapper. Wetenschappers noemen de benadering waarbij voortdurend vragen worden geformuleerd en antwoorden worden gezocht de *wetenschappelijke methode*, maar wat jij elke dag doet is in feite hetzelfde, maar dan zonder fraaie naam. In hoofdstuk 2 lees je alles wat je moet weten over de wetenschappelijke methode; hier bied ik een kort overzicht van wat deze term inhoudt.

## Elke dag waarnemingen doen

*Waarnemingen* bestaan gewoon uit informatie die je met je vijf zintuigen verzamelt. Het is niet mogelijk te leven zonder informatie met je zintuigen te verzamelen en aan de hand van die informatie beslissingen te nemen.

Neem het volgende eenvoudige voorbeeld: als je voor een zebrapad staat, kijk je in beide richtingen om te bepalen of er een auto aankomt en of een naderende auto langzaam genoeg gaat om veilig de straat over te steken voordat die jouw plek heeft bereikt. Je hebt hierbij een waarneming gedaan, informatie verzameld en op basis van die informatie een beslissing genomen, net als een wetenschapper!

## Conclusies trekken

Je gebruikt je verzamelde waarnemingen voortdurend om conclusies over allerlei zaken te trekken. Hoe meer informatie je verzamelt (hoe meer waarnemingen je doet), hoe degelijker je conclusie zal zijn. Hetzelfde proces vindt plaats bij wetenschappelijke verkenningen. Wetenschappers verzamelen informatie aan de hand van waarnemingen, doen een gefundeerde aanname (een zogenoemde *hypothese*) over hoe iets werkt en proberen deze inschatting vervolgens door middel van een reeks experimenten te testen.

Geen enkele wetenschapper wil overhaaste conclusies trekken! Goede wetenschap is gebaseerd op veel waarnemingen en grondig testen met herhaalde experimenten. De belangrijkste wetenschappelijke ontdekkingen zijn meestal gebaseerd op gefundeerde aannamen, experimenten en pogingen tot weerlegging door andere wetenschappers.

# Aandacht voor de vorming en verandering van gesteente

Zoals in deel 2 van dit boek gedetailleerd wordt uitgelegd, bestaat de kern van de geologie uit het bestuderen van gesteenten. Gesteenten zijn dan ook letterlijk de bouwstenen van de aarde en haar uiterlijke kenmerken (zoals bergen, valleien en vulkanen). De materialen waaruit stenen bestaan, zowel binnen de aarde als op het aardoppervlak, veranderen voortdurend van vorm, al neemt dit zeer veel tijd in beslag. Deze gesteentecyclus en de processen van de vorming en verandering van gesteenten zijn waarneembaar bij de kenmerken van stenen die tegenwoordig op het aardoppervlak worden gevonden.

## Begrijpen hoe stenen ontstaan

De kenmerken van gesteenten, zoals vorm, kleur en locatie, vertellen een verhaal over hoe en waar ze zijn ontstaan. Een groot deel van de geologische kennis is gebaseerd op het begrijpen van de processen en omstandigheden van steenvorming. Sommige gesteenten vormen zich bijvoorbeeld diep in de aarde onder intense hitte en druk. Ander gesteente vormt zich op de bodem van de oceaan na jaren van verdichting en cementatie. De drie basistypes gesteenten, die in hoofdstuk 7 gedetailleerd aan bod komen, zijn:

- » **Stolling.** Stollingsgesteente wordt gevormd als vloeibaar gesteente, zogenoemd *magma* of *lava*, afkoelt. Dit soort gesteente wordt dan ook meestal met vulkanen geassocieerd.
- » **Sedimentair.** De meeste sedimentaire gesteenten (afzettingsgesteenten) worden gevormd door de cementatie van sedimentdeeltjes die zich hebben afgezet op de bodem van een waterbekken, zoals een oceaan of een meer. Er zijn ook enkele sedimentaire gesteenten die niet op deze manier zijn gevormd. Daarover lees je meer in hoofdstuk 7.
- » **Metamorf.** Metamorfe gesteenten ontstaan als een sedimentair, stollings- of ander metamorf gesteente onder intense druk komt te staan of wordt blootgesteld aan grote hoeveelheden hitte (maar niet genoeg om het te smelten), waardoor de minerale samenstelling verandert.

Elke steen vertoont kenmerken die het gevolg zijn van het specifieke proces en de omgevingsomstandigheden (zoals temperatuur of waterdiepte) van zijn vorming. Hierdoor biedt elke steen aanwijzingen voor gebeurtenissen die in het verleden van de aarde hebben plaatsgevonden. Inzicht in het verleden helpt ons het heden en misschien wel de toekomst te begrijpen.

## Door de gesteentecyclus tuimelen

De opeenvolging van gebeurtenissen die een steen van de ene soort in een andere veranderen, is in de gesteentecyclus geordend. Er is sprake van een cyclus, oftewel kringloop, omdat er geen echt begin of einde is. Alle verschillende soorten gesteente en de verschillende aardprocessen die plaatsvinden, zijn opgenomen in de gesteentecyclus of gesteentekringloop. Deze cyclus legt uit hoe materialen worden verplaatst en gerecycled in verschillende vormen op het aardoppervlak (en net eronder). Als je de gesteentecyclus eenmaal doorgrondt, besef je dat elke steen op het aardoppervlak zich in een andere fase van transformatie bevindt en dat dezelfde materialen op een dag een heel andere steen kunnen vormen!

## Continentale bewegingen in kaart brengen

De meeste gesteentevormende processen van de gesteentecyclus zijn afhankelijk van bewegingskrachten, hitte of begraving. Het ontstaan van bergen vereist bijvoorbeeld een kracht die in twee richtingen wordt uitgeoefend, waarbij stenen omhoog worden geduwd of samengevouwen. Dit type beweging is het resultaat van de bewegingen van continentale platen. Het idee dat het aardoppervlak is opgedeeld in verschillende puzzelachtige stukjes die bewegen, is een relatief nieuw concept in de aardwetenschappen, de theorie van platentektoniek (het onderwerp van deel 3).

## De allesomvattende theorie van platentektoniek

Vele tientallen jaren bestudeerden aardwetenschappers verschillende delen van de aarde zonder te weten hoe alle kenmerken en processen die ze onderzochten met elkaar verbonden waren. Het idee van plaatbewegingen ontstond al vroeg in de studie van de geologie, maar het duurde even voordat er voldoende overtuigend bewijs was verzameld, zoals je in hoofdstuk 8 leest.

Tegen het midden van de twintigste eeuw hadden wetenschappers de Mid-Atlantische Rug ontdekt en informatie verzameld over de leeftijd van stenen op de zeebodem bij deze bergketen. Aan de hand van dit bewijs kwamen ze met de theorie van platentektoniek, die stelt dat de aardkorst in stukken, oftewel platen is opgebroken. De plek waar twee tektonische platen elkaar raken en op elkaar inwerken, wordt een *plaatgrens* genoemd.

De manier waarop deze platen (of schollen) precies op elkaar inwerken, wordt bepaald door het type beweging en het type aardkorstmateriaal. Deze interacties worden beschreven als plaatgrenstypen en omvatten:

- » **Convergente grenzen.** Bij convergente grenzen bewegen twee tektonische platen naar elkaar toe en komen ze samen. Afhankelijk van de dichtheid van de platen zorgt deze botsing voor het ontstaan van bergen of veroorzaakt die *subductie*, waarbij de ene plaat onder de andere schuift, waardoor vulkanen ontstaan.
- » **Divergente grenzen.** Bij divergente plaatgrenzen bewegen twee platen uit elkaar. Deze grenzen worden meestal waargenomen op de zeebodem, waar het opwellen van magma langs de grens een mid-oceanische rug creëert, maar ze kunnen ook voorkomen op continenten, zoals in de Grote Slenk, een Afrikaanse riftvallei.
- » **Transforme grenzen.** Bij transforme plaatgrenzen botsen of scheiden de twee platen niet, maar bewegen ze gewoon naast elkaar.

In hoofdstuk 9 lees je meer over de verschillende kenmerken van continentale platen en de manier waarop die op elkaar inwerken als ze over het aardoppervlak bewegen, inclusief de specifieke geologische kenmerken die bij elk plaatgrenstype horen.

## Debatteren over een mechanisme voor plaatbewegingen

De verenigende theorie van platentektoniek is algemeen geaccepteerd in de wetenschappelijke gemeenschap, al moeten geologen het nog wel eens worden wat de beweging van continentale platen precies aanstuurt.

Er wordt aangenomen dat er drie dominante krachten samenwerken bij de beweging van tektonische platen:

- » **Mantelconvectie.** Convectie van de aardmantel, de beweging van verwarmd gesteente onder de aardkorst, wordt beschouwd als de dominante veroorzaker van plaatbeweging. Als mantelgesteente wordt verwarmd, beweegt het naar buiten in de richting van de korst, koelt dan af en zakt terug naar de kern (zeg maar zoals de was in een lavalamp). Tijdens deze beweging worden de platen die op de buitenmantel rusten meegedragen.
- » **Ridge-push.** Deze hellingkracht is het resultaat van de vorming van nieuw gesteente op een mid-oceanische rug. Doordat er een nieuwe

korst aan de plaatrand ontstaat, wordt de plaat van de rand weggeduwd in de richting van de buitenste of tegenoverliggende rand.

- » **Slab-pull.** Terwijl de plaat wordt weggeduwd, zal de buitenrand ervan in de mantel zinken en de plaat met zich meetrekken; deze trekkracht wordt slab-pull genoemd (slab is Engels voor plaat).

Deze drie krachten zijn samen verantwoordelijk voor de plaatbeweging. In hoofdstuk 10 lees je meer over de manier waarop ze het aardoppervlak voortdurend van vorm veranderen.

## Stenen op het aardoppervlak verplaatsen

Op een kleinere dan wereldwijde schaal worden er constant stenen op het aardoppervlak verplaatst. Tot de oppervlakteprocessen in de geologie behoren veranderingen die veroorzaakt worden door zwaartekracht, water, ijs, wind en golven. Deze krachten zijn van invloed op het aardoppervlak en creëren landvormen en landschappen op manieren die veel gemakkelijker te observeren zijn dan de uitgebreide processen van gebergtevorming en tektonische beweging. Dit zijn bovendien geologische processen die je in het dagelijks leven vaker tegenkomt.

- » **Zwaartekracht.** Op aarde beschouwen we zwaartekracht misschien als iets vanzelfsprekends, maar de invloed ervan op het verplaatsen van gesteenten en sediment is aanzienlijk. Er ontstaan bijvoorbeeld aardverschuivingen als de zwaartekracht het van wrijving wint en materialen naar beneden trekt. Het resultaat van de aantrekkingskracht van de zwaartekracht is massaverlies, wat ik in hoofdstuk 11 uitleg.
- » **Water.** Tot de meest voorkomende oppervlakteprocessen behoren de beweging van stenen en sediment door stromend water in rivieren en andere waterwegen. Het water baant zich een weg over het aardoppervlak, verwijdert en deponeert sediment en verandert hierbij het uiterlijk van het landschap. De verschillende manieren waarop stromend water het land vormt, worden in hoofdstuk 12 beschreven.
- » **Ijs.** De beweging van ijs lijkt op die van stromend water, maar is veel krachtiger. Bevroren water kan door gletsjererosie en afzetting het landschap van een volledig continent vormen. De langzaam stromende beweging van ijs en het effect ervan op het landschap worden in hoofdstuk 13 behandeld.

- » **Wind.** De kracht van de wind komt het meest voor in droge gebieden. De landvormen die hierdoor ontstaan, ken je natuurlijk wel: *duinen*. Maar misschien beseft je niet dat de snelheid en de richting van de wind veel verschillende soorten duinen kan creëren; die komen in hoofdstuk 14 aan bod.
- » **Golven.** Langs de kust is water in de vorm van golven verantwoordelijk voor het vormgeven van kustlijnen en het maken (of vernietigen) van stranden. In hoofdstuk 15 beschrijf ik gedetailleerd de verschillende landvormen die aan de kust ontstaan doordat golven sedimenten verwijderen of achterlaten.

## De lange geschiedenis van het leven op aarde interpreteren

Een van de voordelen van het bestuderen van geologie is de mogelijkheid te ontdekken welke geheimen uit het verleden in stenen zijn verborgen. Sedimentgesteenten, laag voor laag gevormd gedurende lange perioden, vertellen het verhaal van de levende geschiedenis van de aarde: veranderende klimaten en omgevingen, naast de evolutie van het leven van afzonderlijke cellen tot de moderne complexiteit.

### Relatieve versus absolute datering

Wetenschappers gebruiken twee benaderingen om de ouderdom van gesteenten en gesteentelagen te bepalen: relatieve datering en absolute datering.

Bij *relatieve datering* worden de leeftijden van gesteentelagen in relatie tot elkaar bekeken, bijvoorbeeld door te stellen dat de ene laag ouder of jonger is dan de andere. De studie van gesteente- of aardlagen wordt *stratigrafie* genoemd. Bij relatieve dateringsmethoden passen geologen stratigrafische principes toe, zoals de volgende:

- » Gesteentelagen onder andere lagen zijn over het algemeen ouder dan gesteentelagen erboven.
- » Alle sedimentaire gesteentelagen zijn oorspronkelijk in een horizontale positie gevormd.
- » Wanneer een afwijkend gesteente door gesteentelagen snijdt, is het doorborende gesteente jonger dan de lagen waar het doorheen snijdt.

Deze en enkele andere principes (die in hoofdstuk 16 aan bod komen) dienen voor *stratigrafen* als richtlijnen bij het interpreteren van de volgorde van gesteentelagen, zodat ze in staat zijn een relatieve ordening aan te brengen in de gebeurtenissen in de geschiedenis van de aarde.

Maar soms volstaat het niet om te weten dat iets ouder (of jonger) is dan iets anders om een vraag te beantwoorden. In zo'n geval wordt gebruik gemaakt van een absolute datering. Absolute dateringsmethoden gebruiken radioactieve atomen, oftewel isotopen, om de leeftijd in numerieke jaren van specifieke stenen en gesteentelagen te bepalen. Absolute dateringsmethoden zijn bijvoorbeeld in staat te bepalen dat specifieke gesteenten 2,6 miljoen jaar oud zijn. Deze methoden zijn gebaseerd op kennis die bij laboratoriumexperimenten is opgedaan: sommige atomen veranderen met een constante snelheid na verloop van tijd in andere atomen. Door deze veranderingssnelheden in het lab te meten, kunnen wetenschappers vervolgens de hoeveelheid van de verschillende atomen in een steen meten en een redelijk nauwkeurige leeftijd voor de vorming ervan geven.

Maar maak je geen zorgen als het proces van het verkrijgen van absolute dateringen uit isotopen erg ingewikkeld lijkt, want in hoofdstuk 16 leg ik veel gedetailleerder uit hoe absolute dateringen worden berekend en hoe ze worden gecombineerd met relatieve datering om de *geologische tijdschaal* te construeren, zeg maar de geologische geschiedenis van de aarde, opgedeeld in verschillende tijdspannen (zoals perioden, tijdvakken en eonen).

## Fossielen als bewijs van evolutie

Het fascinerendste verhaal dat in de gesteentelagen wordt verteld, is dat van de evolutie van de aarde. Evolueren betekent simpelweg veranderen in de loop der tijd. En evolueren heeft de aarde zeker gedaan in de 4,5 miljard jaar sinds haar ontstaan.

Zowel de aarde zelf als de organismen die op aarde leven zijn in de loop der tijd veranderd. In hoofdstuk 17 leg ik kort het biologische aspect van evolutie uit. Veel van de moderne kennis over hoe soorten in de loop van de tijd zijn veranderd, is gebaseerd op bewijs van *gefossiliseerde* of bewaarde levensvormen in de gesteentelagen. Fossilisatie vindt plaats via verschillende geologische en chemische processen, maar alle fossielen zijn in een van de volgende twee vormen in te delen:

- » **Fossiele resten.** Overblijfselen van een organisme zelf of een afdruk van het lichaam van het organisme.
- » **Ichnofossielen.** Overblijfselen van de activiteit van een organisme, zoals beweging (een pootafdruk) of levensstijl (een hol), maar zonder enige indicatie van het werkelijke lichaam van het organisme. Ze staan ook bekend als sporenfossielen.

Er is niet altijd leven op aarde geweest. In hoofdstuk 18 beschrijf ik de zeer vroege aarde als een levenloze, hete, atmosfeervrije planeet in de beginjaren van de vorming van ons zonnestelsel. Het duurde miljarden jaren voordat eenvoudige, eencellige organismen verschenen, al is hun oorsprong nog steeds een wetenschappelijk raadsel.

Eenvoudig, eencellig leven ontstond vele miljoenen jaren voordat zich meer complexe organismen op aarde ontwikkelden. Zelfs toen gingen er miljoenen jaren voorbij met levensvormen met een zacht lichaam die moeilijk te vinden zijn in het fossielenbestand. Pas 520 miljoen jaar geleden vond de *Cambrische explosie* plaats. Hoofdstuk 19 beschrijft deze plotselinge verschijning van schelpvormend, complex leven en de miljoenen jaren die volgden toen het leven zich bijna volledig in de oceanen afspeelde, totdat amfibieën op het land verschenen.

Hoofdstuk 20 gaat over het tijdperk van reptielen, toen dinosaurussen op de aarde heersten en reptielen de lucht en de zeeën vulden. Tijdens deze periode waren alle continenten van de aarde met elkaar verbonden als Pangea, het recentste supercontinent van de aarde. Maar voordat het tijdperk van de reptielen eindigde, viel Pangea uiteen in de afzonderlijke continenten die tegenwoordig nog bestaan. Bewijs voor Pangea is nog steeds zichtbaar in de kustcontouren van Zuid-Amerika en Afrika, die aangeven waar ze vroeger aan elkaar vastzaten als onderdeel van het supercontinent.

Relatief kort geleden, geologisch gezien, namen zoogdieren het van de reptielen over op aarde. Het Cenozoïcum, dat 65,5 miljoen jaar geleden begon en dat we nog steeds meemaken, is het recentste en daarom gedetailleerdste deel van de geschiedenis van de aarde dat kan worden bestudeerd in het geologische archief (het gesteente). Veel opvallende geologische kenmerken van de moderne aarde, zoals de Grand Canyon en de Himalaya, zijn in dit recente tijdperk gevormd. In hoofdstuk 21 beschrijf ik de evolutie van zoogdiersoorten (inclusief mensen) en de geologische veranderingen die hebben plaatsgevonden en tot de huidige situatie hebben geleid.

Op meerdere momenten in de geschiedenis van de aarde zijn veel verschillende soorten in korte tijd massaal uitgestorven in wat wetenschappers *massa-extincties* noemen. In hoofdstuk 22 beschrijf ik de vijf grootste massa-extincties in de geschiedenis van de aarde. Ik leg ook enkele veelvoorkomende hypothesen uit voor de oorzaak van dit massale uitsterven van soorten, waaronder klimaatverandering en asteroïde-inslagen. Ten slotte leg ik uit hoe de aarde tegenwoordig mogelijk een moderne massa-extinctie doormaakt als gevolg van menselijke activiteiten.